

고분자 분쇄 기술을 활용한 고체 알칼리연료전지용 이오노머 바인더 용액 개발

신문식[†] · 김도형[†] · 강문성 · 박진수*

상명대학교 공과대학 환경공학과

(2016년 8월 14일 접수 : 2016년 8월 25일 채택)

Development of Ionomer Binder Solutions Using Polymer Grinding for Solid Alkaline Fuel Cells

Mun-Sik Shin[†], Do-Hyeong Kim[†], Moon-Sung Kang, and Jin-Soo Park*

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Sangmyung University, 31 Sangmyungdae-gil,
Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam Province, 31066, South Korea

(Received August 14, 2016 : Accepted August 25, 2016)

초 록

본 연구에서는 고체알칼리 연료전지용 이오노머 바인더 용액 제조를 위하여 poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)(PPO)를 동결 분쇄하고 4급 암모늄화 반응을 진행하여 음이온 전도성 이오노머(quaternized PPO, QPPO) 용액을 제조하였다. QPPO 이오노머 바인더 용액의 종류를 고분자의 분쇄 시간을 통하여 제조하였고, 이에 따른 분산도, 입자의 크기 및 전기화학적 성능 등을 분석하였다. 이를 통해 기존의 비 분쇄 고분자를 활용하여 제조한 이오노머 바인더 용액보다 분쇄 고분자를 활용한 이오노머 바인더 용액이 높은 고분자 분산도와 낮은 입자 크기를 확보하였다. 제조한 이오노머 바인더 용액(BPPO-G120s)의 최대 이온전도도는 0.025 S cm^{-1} 이었으며, 이온교환용량은 1.26 meq g^{-1} 을 보였다.

Abstract : In this study, an anion-exchange ionomer solution was prepared by grinding poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (PPO) in liquid nitrogen for solid alkaline fuel cells (SAFCs). Type of quaternized PPO (QPPO) solutions was controlled by grinding time. The ionomer binder solutions were characterized in terms of dispersity, particle size, and electrochemical properties. As a result, ionomer binder solutions using grinded polymer showed higher dispersion and smaller particle size distribution than that using non-grinded polymer. The highest ionic conductivity and IEC of the membrane recast by using BPPO-G120s were 0.025 S cm^{-1} and 1.26 meq g^{-1} , respectively.

Keywords : anion-exchange ionomer solution, poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), dispersion of ionomer solution, solid alkaline fuel cell, polymer grinding

1. 서 론

수소이온교환막 연료전지(PEMFC, proton exchange

membrane fuel cell)는 높은 전류밀도와 소음이 적으며, 환경오염 물질을 발생시키지 않는 장점으로 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만, 최근 PEMFC에 비해 저가의 재료를 사용하고, 빠른 산소환원 반응을 이용하는 고체 알칼리 연료전지(SAFC, solid alkaline fuel cell)의 연구가 큰 관심을 받고 있다. 산성 분위기

[†] 본 논문에 기여 정도가 제 1 저자로서 동일함

*E-mail: energy@smu.ac.kr

에서는 열역학적으로 전극상에서 산소의 환원반응이 일어나기 매우 어려워, 고가의 백금을 전극촉매 물질로 사용하여야 하나 염기성 분위기에서는 전극촉매에서 산소환원반응이 용이하게 일어남에 따라 고가의 백금 대신 Ni, Mn 등 저가의 비귀금속을 촉매로 사용이 가능하다. SAFC는 기존의 액상전해질을 사용하는 알칼리연료전지가 가진 근본적인 문제점인 1) CO₂에 의한 전해질의 침전 2) 전해질의 강한 부식특성 3) 액상 전해질 사용에 따른 sealing 및 압력 관리 문제 등을 음이온(OH⁻)교환막의 사용으로 해결할 수 있는 기술로 알려져 있다. 최근 연구의 주요 쟁점으로는 1) 음이온교환막의 안정성 및 이온전도도 2) 음극에서의 촉매 활성화 3) 이산화탄소에 의한 피독 4) 이오노머 바인더의 부재 또는 낮은 성능으로 보고 되고 있다.¹⁻⁷⁾

최근 연구된 음이온 교환막들은 음이온 교환기 그룹을 4급화 암모늄(quaternized ammonium) 그룹을 사용하고 있으나 높은 온도(>80°C) 및 염기 분위기에서는 친핵성 치환(nucleophilic displacement) 또는 Hoffman elimination에 의해 낮은 화학적 안정성을 보인다.^{8,9)} 음이온교환막의 화학적 안정성을 높이기 위해 quaternized poly(ether sulfone)s^{10,11)}, quaternized polyphenylene^{12,13)}, quaternized poly(phenylene oxide)¹⁴⁾, quaternized poly(vinyl alcohol)¹⁵⁾, imidazoliumbased copolymers⁹⁾ 등의 다양한 음이온막 연구가 진행 되고 있다.

하지만 SAFC는 PEMFC에 비해 상대적으로 낮은 성능을 보이고 있으며, 이는 음이온교환막의 연구에 비해 음이온 전도성 전해질막과 전극촉매 슬러리에 사용하는 이오노머 바인더(ionomer binder) 연구가 부족하기 때문에 높은 성능의 막-전극접합체(MEA, membrane-electrode assembly)가 개발되어지지 않고 있다. 이오노머 바인더는 고분자전해질을 이용하는 연료전지에서 1) 전극 구조를 형성하기 위해 촉매를 지지해 주는 바인더 역할과 2) 전극의 최외층에서 전기 화학반응에 의해 생성된 이온들을 전해질막까지 이동시켜주는 이오노머 역할을 동시에 수행하는 전극 구성요소로 전극 내에서 삼상계면(triple phase boundary, TPB)을 형성한다.^{15,16)} MEA의 성능이 결정되는 전극에서는 최적의 삼상계면이 형성되어야 하고 전극 내에서 OH⁻ 이온을 전도할 수 있는 이오노머 바인더의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 SAFC용 음이온교환 이오노머 바인더를 내화화성 및 물리적 강도가 우수한 poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)(PPO)를 기저물질로 선택하여 고 음이온 전도성 이오노머 바인더 용액을 개발하였으며, 개발된 이오노머 바인더의 분산도에 따른 성능의 변화를 확인하였다. 본 연구팀의 선행연구를 통하여 기존 PPO를 멤브레인 제조 후 이온교환기를

도입하는 후처리(post-treatment)방식의 대안으로 공용매(co-solvent)의 개념을 도입하여 trimethylamine(TMA)과 brominated PPO(BPPO)를 함께 용해시켜 이온교환기를 도입하는 방법을 이용하였다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 이는 기존 이온교환기의 치환 후 대부분 용매에 녹지 않아 이오노머 바인더로 사용할 수 없었던 단점을 해결할 수 있었다. 또한, 별도의 4급 암모늄화를 위한 과정이 필요하지 않아 전극의 제조과정을 간소화할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 이오노머 바인더의 다양한 분산도를 위해 기저물질인 BPPO를 액화질소에 동결 분쇄하여 고분자의 입자크기를 조절한 후 TMA와 함께 용해시켜 이오노머 바인더 용액을 제조하였고, 본 용액 및 본 용액으로 제조한 음이온교환막의 다양한 특성을 확인하였다.

2. 실험 및 방법

2.1. 음이온 교환 이오노머 용액 제조

Quaternized poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)(QPPO) 음이온 교환 이오노머 용액을 제조하기 위해 PPO(Sigma Aldrich, USA) 벤젠링의 benzyl 위치에 브롬의 치환(bromination)이 선행되었다. PPO를 chlorobenzene(Sigma Aldrich, USA)에 8wt%로 용해시킨 뒤, Br₂ 용액(20wt% in chlorobenzene)을 첨가한 뒤 131°C에서 10시간 동안 질소 분위기에서 반응을 진행하였다. 이때 PPO와 Br₂의 몰비율은 1:1로 고정하였다. 제조된 BPPO 고분자 용액을 메탄올에 침전시킨 후 수 차례 세척을 하였다. 세척한 BPPO는 60°C 진공오븐에서 12시간 이상 건조하였다.^{17,18)} 건조한 BPPO에 액체질소를 첨가한 후 분쇄기를 통하여 시간별(각각 0, 30, 90, 120초, 시료명은 BPPO-G0s, BPPO-G30s, BPPO-G60s, BPPO-G90s, BPPO-120s로 명명)로 분쇄하였고, 분쇄 BPPO를 dimethylformamide (DMF, Sigma Aldrich, USA)와 TMA 수용액(45wt% in water, Sigma Aldrich, USA)을 이용하여 실온에서 용해시켜 QPPO 이오노머 바인더 용액을 제조하였다. 이오노머 바인더의 용액은 5wt% 농도로 제조되었으며, BPPO : TMA 의 몰비율은 1 : 1로 고정하였다. 제조된 QPPO는 각각 사용된 BPPO의 샘플명에 따라 QPPO-G0s, QBPPO-G30s, QBPPO-G60s, QBPPO-G90s, QBPPO-120s로 명명하였다.

2.2. 음이온 교환 이오노머 용액 및 음이온 교환막의 특성 분석

제조된 이오노머 용액의 평균 입경과 그 분산도를 분석하기 위해 동적광산법(Dynamic light scattering, DLS, zeta potential analyzer ELS-Z)을 통해 분석하였다.

멤브레인의 전기화학적 특성을 분석하기 위하여 상기 QPPO 이온노머 용액을 페트리디쉬 위에 캐스팅한 후 50°C 진공오븐에서 12시간 동안 건조하여 평가용 멤브레인을 제조하였다. 이온전도도는 임피던스 스펙트로스코피(SP-150, Bio-Logic Science Instruments, France)를 사용하여, 실험실에서 제작한 2-point probe 클립 셀(clip cell)을 이용하여 1 M KOH 수용액에서 측정하였다. 2 전극 시스템에서 0.1~10⁵ Hz의 주파수 범위, 5 mV의 전압세기를 가지는 교류 전원에서 측정하였다. 이온전도도를 측정하기 전 막은 1 M KOH에 12시간 이상 담구어 막의 기능기 말단을 Cl⁻에서 OH⁻ 형태로 치환한 뒤 측정하였다. 이렇게 구한 고분자 전해질 막의 impedance R값을 아래의 식을 이용해 수소 이온전도도 σ 값을 계산하였다.¹⁸⁻²³⁾

$$\sigma = \frac{t}{((R - R_{\text{blank}}) \times A)} \quad (1)$$

여기서, t 은 막의 두께, A 는 전극의 유효면적, R 은 측정된 임피던스 값, R_{blank} 는 1M KOH 용액의 측정된 임피던스 값이다.

함수율(water uptake, WU)은 멤브레인의 젖은 무게와 건조 무게의 차이를 측정하여 산정되었으며 이온교환용량(ion-exchange capacity, IEC)을 측정하기 위해 은적정법을 통해 정량분석을 하였다.²⁰⁻²²⁾

3. 결과 및 고찰

PPO 기저고분자의 브롬화 및 4급 암모늄화 반응은 선행연구를 통하여 성공적으로 이루어짐을 확인할 수 있었다. Fig. 1에 PPO의 브롬화 및 TMA를 이용한 4급 암모늄화에 대한 반응을 나타내었다.^{17,18)} 본 연구에서는 benzyl 위치에 브롬화된 BPPO를 액체질소 안에서 분쇄하여 TMA와 DMF에 용해시켜 이온노머 바인더 용액의 분산에 따른 물성 변화를 확인하려 하였다.

Fig. 2는 BPPO를 액체질소에서 시간별로 분쇄한 후의 파우더를 보여주며, Fig. 3은 광학 전자 현미경으로 55배 확대한 관찰한 사진을 보여준다. 분쇄의 시간에 따라 입자의 크기가 감소 됨을 확인 하였으며, Table 1에 분쇄된 BPPO의 입자크기를 나타내었다. 분

쇄된 입자들은 균일한 사이즈를 가지지 않지만, 120초 분쇄한 BPPO-G120s의 경우 40 μm 의 작은 입자들이 대부분 분포가 되었음을 관찰하였다. 또한 분쇄의 시간이 길수록 분쇄한 입자들의 뭉침 현상들이 줄어 드는 것을 확인하였다.

상기 BPPO-G 파우더를 이용하여 선행연구에서 개발된 공용매의 개념을 도입한 직접 4급 암모늄화 반응을 진행하였다. 이때 이온노머 바인더 용액은 5 wt%의 농도를 갖도록 DMF를 첨가하여 용해시켰다. BPPO는 DMF에서는 녹지 않으나, TMA를 첨가하여 4급 암모늄화 반응을 동시에 진행시켜 고분자의 결사슬기의 친수성기를 확보함에 따라 용해가 될 수 있다. 분쇄하지 않은 BPPO-G0s의 경우 상온 48시간 동안 교반을



Fig. 2. Photographs of (A) samples; (B) BPPO-G30s powder; (C) BPPO-G60s powder; (D) BPPO-G90s powder; (E) BPPO-G90s powder.

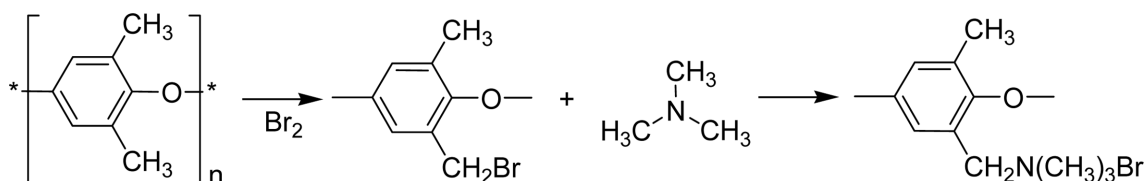


Fig. 1. Scheme of quaternization of brominated PPO with TMA.

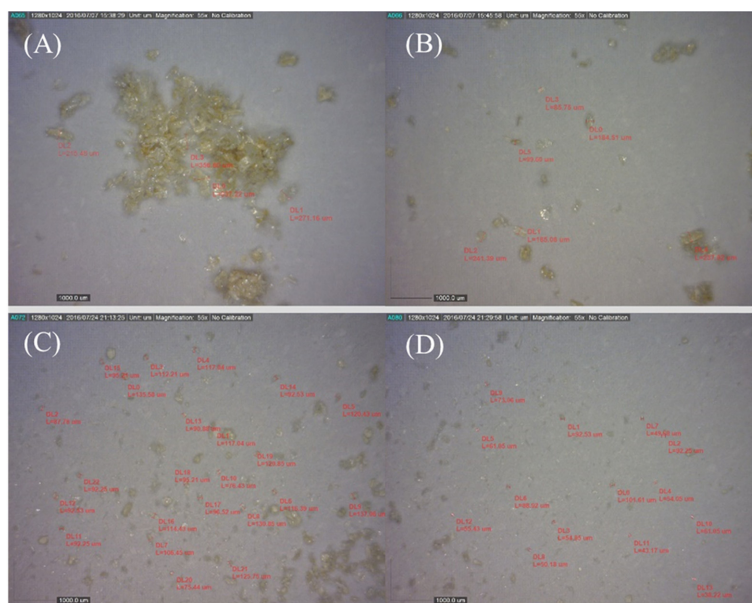


Fig. 3. Photographs ($\times 55$) of (A) BPPO-G30s particles; (B) BPPO-G60s particles; (C) BPPO-G90s particles; (D) BPPO-G120s particles.

Table 1. Particle sizes of various grinded BPPOs.

Sample name	Particle size (μm)
BPPO-G30s	200~350
BPPO-G60s	90~240
BPPO-G90s	70~140
BPPO-G120s	40~140

하였음에도 부분적으로 용해되지 않음을 확인하였고, 분쇄를 진행한 BPPO 파우더들은 상온 2시간 내외로 용해됨을 확인하였다. 이를 통해 분쇄과정을 통해 입자의 크기를 줄여 표면적을 증가시켜줌이 실제 4급 암모늄화 반응을 용이하게 할 수 있음을 확인하였다.

제조된 QPPO 음이온 교환 이오노머 용액의 분산도와 용해된 고분자 나노입자의 분포도를 확인하기 위해 DLS를 시행하여 분석하였으며, 부분용해된 QPPO-G0s는 분석에서 제외시켰다. 분석의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. DLS는 빛을 산란시키는 입자의 Brown 거동에 의한 산란광의 시간 및 주파수 변화를 산란광의 Doppler broadening을 이용하여 입자들의 확산계수와 이완시간 등을 측정하여 입자의 수, 크기, 형태 및 전하 등을 측정할 수 있다. Fig. 4의 전하의 측정 결과에서 입자의 분포는 크게 세 부분으로 나뉘고 있으며, 이는 QPPO 이오노머 바인더 용액이 다분산의 형태를 띠고 있음을 확인 할 수 있었다. 전체 입자의 크기에 해당하는 10%미만의 입자분포와 50%

Table 2. Diameter and polydispersity index of various QPPO ionomer solutions.

Sample name	Average of diameter (nm)	Polydispersity index (P.I.)
QPPO-G30s	4840.5 ± 115	1.37 ± 0.03
QPPO-G60s	1352.5 ± 208	0.436 ± 0.067
QPPO-G90s	1144.9 ± 22	0.381 ± 0.004
QPPO-G120s	1143.5 ± 75	0.379 ± 0.018

에 해당하는 입자의 분포, 90%에 해당하는 입자분포로 나뉘져 있으며, 이러한 입자의 분포는 QPPO의 주쇄는 녹이지 못하고 고분자 사슬만 녹이는 것으로 확인하였다. BPPO의 분쇄시간이 증가함에 따라 이오노머 바인더 용액의 입자사이즈, 분포되는 부피 등이 낮은 입자크기로 분포됨을 확인하였다. 이 결과 BPPO의 분쇄를 통해 4급 암모늄화 반응 시 많은 입자들이 반응이 진행 되었음을 유추할 수 있다. Table 2에 분쇄시간에 따른 평균 입자크기와 분산도를 계산한 polydispersity index(PI)를 나타내었고, 평균 입자크기가 4840 nm에서 1143 nm까지 줄어든 것을 확인하였다. 또한, PI값이 평균 입자크기가 줄어들면서 같이 줄어드는 것을 관찰되었고 이오노머 용액에서의 분산도가 증가 함을 확인 하였다.

Fig. 5에서는 QPPO 이오노머 바인더 용액을 이용한 QPPO 멤브레인의 전기화학적 성능인 이온전도도, 이온교환용량, 함수율 등의 결과를 나타내었다.²⁴⁻²⁷⁾ 제

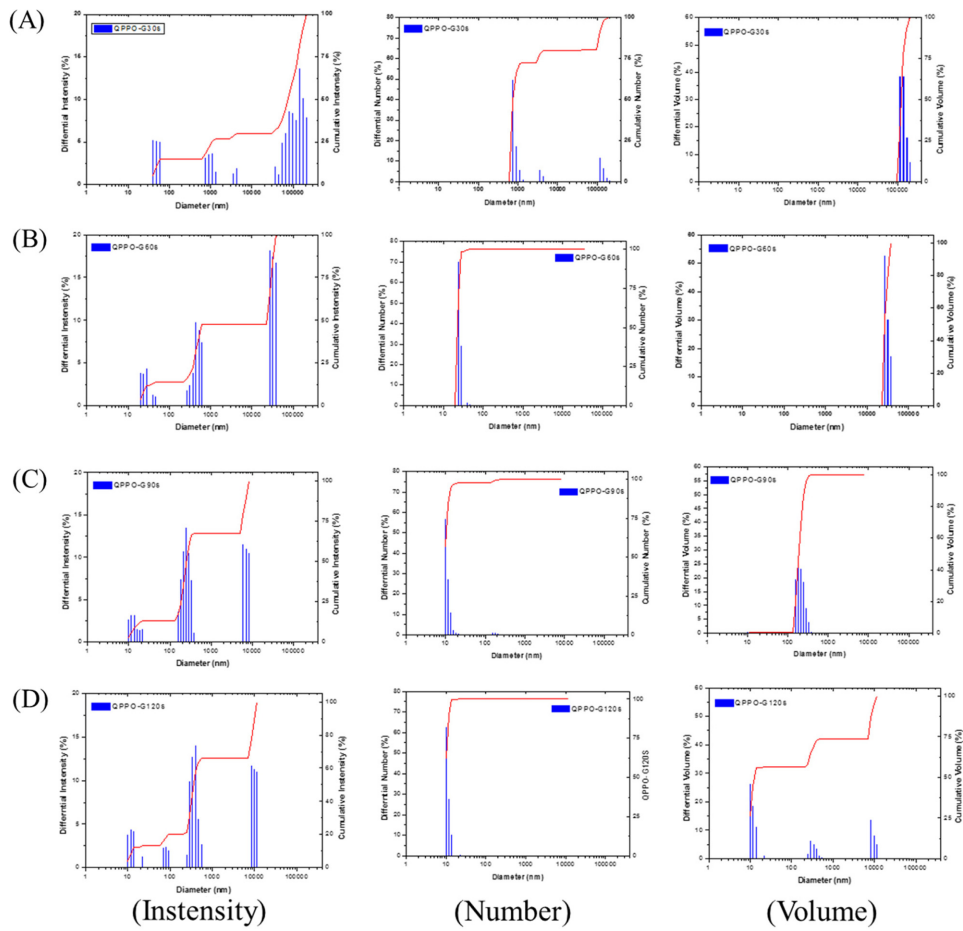


Fig. 4. DLS analysis of various QPPO membranes.

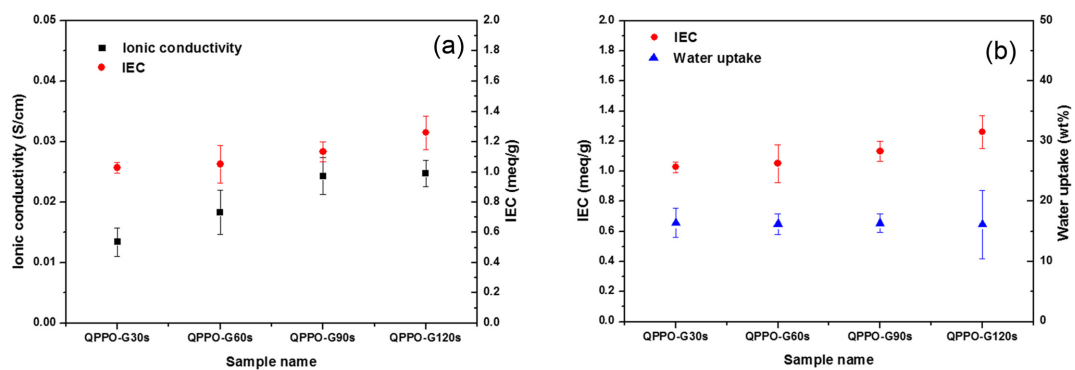


Fig. 5. Ionic conductivity, IEC and water uptake of various QPPO membranes.

조된 QPPO 멤브레인은 BPPO에 대한 TMA의 몰비율을 동일한 1 : 1로 고정하였으나, 이오노머 바인더 용액의 평균 입자크기와 분산도에 따라 다른 결과를

보여 주었다. 이온전도도는 가장 낮은 0.013 S cm^{-1} (QPPO-G30s)에서 가장 높은 0.025 S cm^{-1} (QPPO-G120s)를 보였으며, 이온교환 용량 또한 분체의 시

간이 증가함에 따라 증가함을 보였다. 이는 이오노머 용액의 분산도가 실제 이온전도도 및 이온교환용량의 성능에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 SAFC의 성능을 향상시키기 위해 PPO를 주쇄로 사용하여 음이온 교환능을 가진 이오노머 바인더 용액인 QPPO 이오노머 바인더 용액을 제조하였다. 또한 BPPO의 분쇄를 통해 이오노머 바인더 용액의 분산도 및 입자의 크기를 조절하여, 성능의 변화를 확인하였다. 이오노머 바인더의 용액의 분산도가 높으며, 용액 안의 고분자의 입자크기가 작으면, 이온전도도 및 이온 교환용량의 향상됨을 보였다. 따라서 본 연구에서 시행한 주쇄의 분쇄를 통한 다양한 분산도의 이오노머 바인더 용액의 연구는 향후 SAFC용 이오노머 바인더 개발의 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원통상부에서 지원하고 한국에너지기술평가원에서 관리하는 신재생에너지핵심기술사업(20153030031720) 및 한국과학기술연구원 기관고유사업(Project No. 2E24841)에 의해 지원받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- G. Couture, A. Alaaeddine, F. Boschet, B. Ameduri, 'Polymeric materials as anion-exchange membranes for alkaline fuel cells', *Prog. Polym. Sci.*, **36**, 1521 (2011).
- M.A. Hickner, A.M. Herring, E.B. Coughlin, 'Anion exchange membranes: Current status and moving forward', *J. Polym. Sci. Pol. Phys.*, **51**, 1727 (2013).
- S. Maurya, S.-H. Shin, Y. Kim, S.-H. Moon, A review on recent developments of anion exchange membranes for fuel cells and redox flow batteries, *RSC Adv.*, **5**, 37206 (2015).
- J.R. Varcoe, P. Atanasov, D.R. Dekel, A.M. Herring, M.A. Hickner, P.A. Kohl, A.R. Kucernak, W.E. Mustain, K. Nijmeijer, K. Scott, 'Anion-exchange membranes in electrochemical energy systems', *Energ. Environ. Sci.*, **7**, 3135 (2014).
- H. Zhang, P.K. Shen, 'Recent development of polymer electrolyte membranes for fuel cells', *Chem. Rev.*, **1**, 122780 (2012).
- B.C. Bae, E.Y. KIM, S.J. Lee, H.J. Lee, 'Research trends of anion exchange membranes within alkaline fuel cell', *New. Renew. Ener.*, **11**, 53 (2015).
- H.J. Lee, Y.W. Choi, T.-H. Yang, B.C. Bae, 'Hydrocarbon composite membranes with improved oxidative stability for PEMFC', *J. Korean Electrochem. Soc.*, **17**, 44 (2014).
- M. Tomoi, K. Yamaguchi, R. Ando, Y. Kantake, Y. Aozaki, H. Kubota, 'Synthesis and thermal stability of novel anion exchange resins with spacer chains', *J. Appl. Polym. Sci.*, **64**, 1161 (1997).
- D. Henkensmeier, H.-R. Cho, H.-J. Kim, C. Nunes Kirchner, J. Leppin, A. Dyck, J.H. Jang, E. Cho, S.-W. Nam, T.-H. Lim, 'Polybenzimidazolium hydroxides - Structure, stability and degradation', *Polym. Degrad. Stabil.*, **97**, 264 (2012).
- J. Yan, M.A. Hickner, 'Anion exchange membranes by bromination of benzylmethyl-containing poly(sulfone)s', *Macromolecules*, **43**, 2349 (2010).
- J.S. Park, G.G. Park, S.H. Park, Y.G. Yoon, C.S. Kim, W.Y. Lee, 'Development of solid?state alkaline electrolytes for solid alkaline fuel cells', *Macromol. Symp.*, **249-250**, 174 (2007).
- M.R. Hibbs, 'Alkaline stability of poly(phenylene)-based anion exchange membranes with various cations', *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, **51**, 1736 (2013).
- M.R. Hibbs, C.H. Fujimoto, C.J. Cornelius, 'Synthesis and characterization of poly(phenylene)-based anion exchange membranes for alkaline fuel cells', *Macromolecules*, **42**, 8316 (2009).
- Y. Wu, C. Wu, J.R. Varcoe, S.D. Poynton, T. Xu, Y. Fu, 'Novel silica/poly (2, 6-dimethyl-1, 4-phenylene oxide) hybrid anion-exchange membranes for alkaline fuel cells: effect of silica content and the single cell performance', *J. Power Sources*, **195**, 3069 (2010).
- M.-S. Shin, Y.-J. Byun, Y.-W. Choi, M.-S. Kang, J.-S. Park, 'On-site crosslinked quaternized poly (vinyl alcohol) as ionomer binder for solid alkaline fuel cells', *Int. J. Hydrogen. Energ.*, **39**, 16556 (2014).
- M.-S. Shin, M.-S. Kang, J.-S. Park, 'Development of anion-conducting ionomer binder solutions for electrodes of solid alkaline fuel Cells', *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **14**, 7793 (2014).
- T. Xu, 'Ion exchange membranes: state of their development and perspective', *J. Membr. Sci.*, **263**, 1 (2005).
- D.-H. Kim, M.-S. Kang, 'Improvement of capacitive deionization performance by coating quaternized poly(phenylene oxide)', *Membrane Journal*, **24**, 322 (2014).
- H.-S. Park, D.-H. Kim, J.S. Park, S.-H. Moon, Y.K. Lee, K.-H. Yeon, M.-S. Kang, 'Surface modification and use of polymer complex agents to mitigate metal crossover of anion-exchange membranes', *J. Colloid. Interf. Sci.*, **430**, 24 (2014).
- Y. Tanaka, 'Ion exchange membranes: fundamentals and application', Elsevier, Amsterdam (2007).
- M.-S. Kang, Y.-J. Choi, and S.-H. Moon, 'Water-swollen cation-exchange membranes prepared using poly(vinyl

- alcohol (PVA)/poly(styrene sulfonic acid-co-maleic acid) (PSSA-MA)', *J. Membr. Sci.*, **207**, 157 (2002).
22. D.-H. Kim, J.-H. Park, S.-J. Seo, J.-S. Park, S. Jung, Y. S. Kang, J.-H. Choi, and M.-S. Kang, 'Development of thin anion-exchange pore-filled membranes for high diffusion dialysis performance', *J. Membr. Sci.*, **447**, 80 (2013).
23. K.-J. Cho, J.-S. Park, 'Prediction of life time of ion-exchange membranes in vanadium redox flow battery', *J. Korean Electrochem. Soc.*, **19**, 14 (2016).
24. J.-S. Park, M.-S. Shin, S.S. Sekhon, Y.-W. Choi, T.-H. Yang, 'Effect of annealing of Nafion recast membranes containing ionic liquids', *J. Korean Electrochem. Soc.*, **14**, 9 (2011).
25. L. Zhang, S.-R. Chae, Z. Hendren, J.-S. Park, M.R. Wiesner, 'Recent advances in proton exchange membranes for fuel cell applications', *Chem. Eng. J.*, **204**, 87 (2012).
26. J.-S. Park, S.-H. Park, S.-D. Yim, Y.-G. Yoon, W.-Y. Lee, C.-S. Kim, 'Performance of solid alkaline fuel cells employing anion-exchange membranes', *J. Power Sources*, **178**, 620 (2008).
27. K.-J. Cho, J.-S. Park, 'Perfluorinated Sulfonic Acid based Composite Membranes for Vanadium Redox Flow Battery', *J. Korean Electrochem. Soc.*, **19**, 21 (2016).